

Podstawy Fizyki IV

Radosław Przeniosło

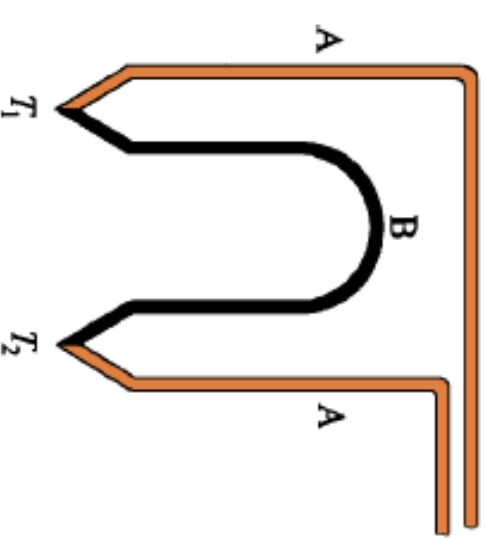
Temperatura empiryczna (ciąg dalszy)

5 marca 2018

Termopary

Termopara to połączenie dwóch różnych metali, tak że tworzą się dwa złącza między nimi (rys.) Jeśli oba złącza znajdują się w różnych temperaturach, to na końcach przewodów pojawia się różnica potencjałów.

Różnica ta, dla danej pary metali, zależy tylko od **różnicy temperatur** między złączami.



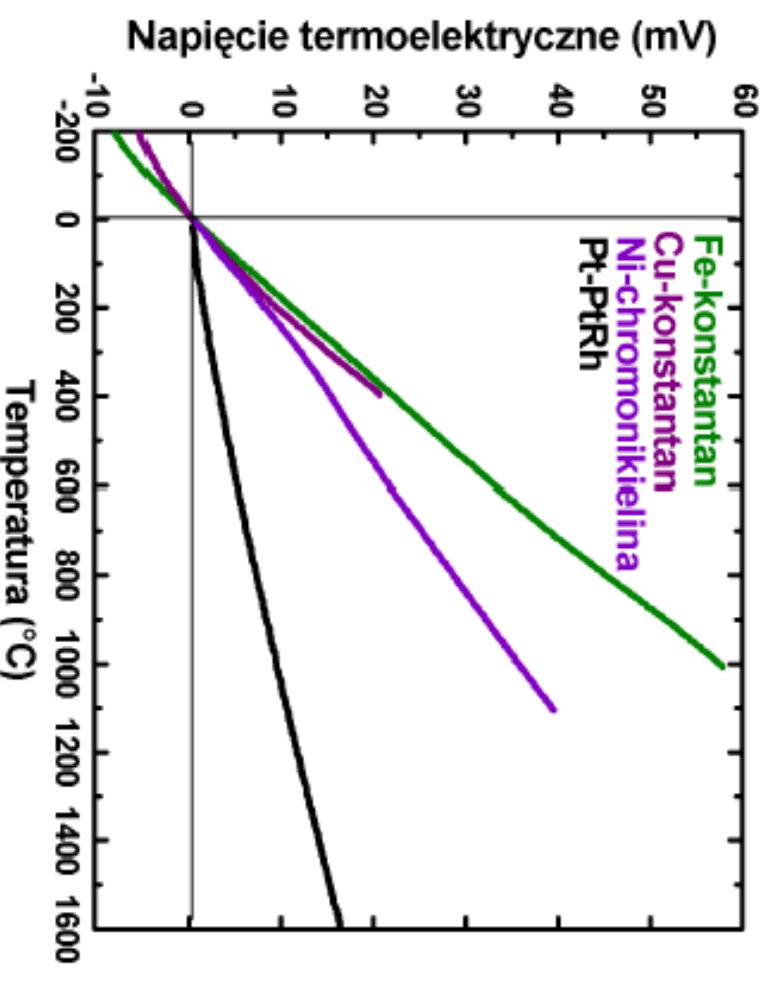
Dla małych $\Delta T = T_2 - T_1$:

$$U(T_2 - T_1) = \alpha(T_2 - T_1),$$

gdzie α jest współczynnikiem (Seebecka) termoelektrycznym termopary.

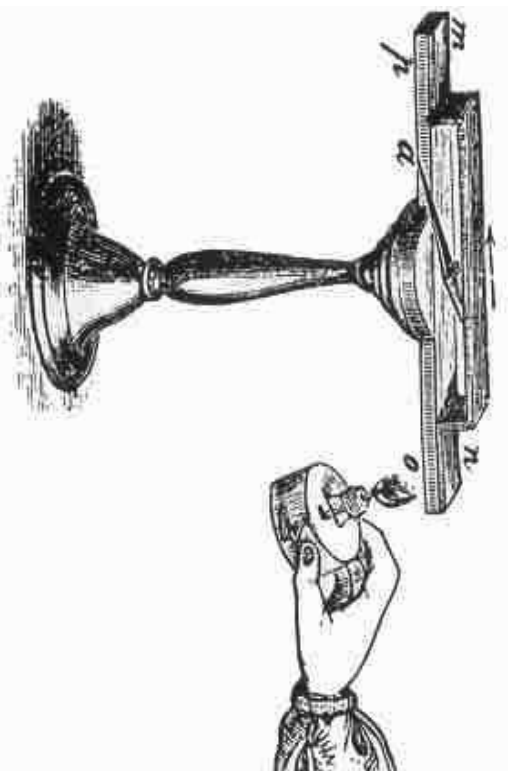
Termopary mają bardzo szeroki zakres stosowności: od 10 K do 1900 K.

☀ termopara wagi ciężkiej



Efekt Seebecka - termopara

W roku 1821 T.J. Seebeck odkrył efekt termoelektryczny (choćaż wydawało mu się że to efekt magnetyczny !!!)

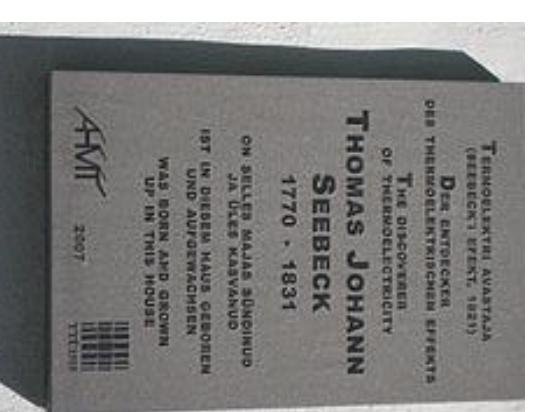


Instrument used by Seebeck to observe the deflection of a compass needle (a) due to a thermoelectric induced current from heating the junction of two different metals (n and o).
From:

<http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/history.html>



Thomas Johann Seebeck
(1770-1831)



Termometry elektryczne oporowe

Opór elektryczny przewodników i półprzewodników zależy od temperatury.



opór metalu i półprzewodnika

Opór właściwy ciał ρ , lub ich przewodnictwo właściwe σ , można wyrazić jako:

$$1/\rho \equiv \sigma = e n \mu ,$$

gdzie n oznacza koncentrację nośników prądu, a μ ich ruchliwość.

Ruchliwość to średnia prędkość dyfuzji nośnika prądu pod wpływem jednostkowego pola elektrycznego.

Przewodniki

Zasadniczy wpływ na zmianę oporu przewodnika z temperaturą ma **ruchliwość** nośników, która maleje wraz ze wzrostem temperatury wskutek rozpraszania elektronów na drganiach sieci krystalicznej.



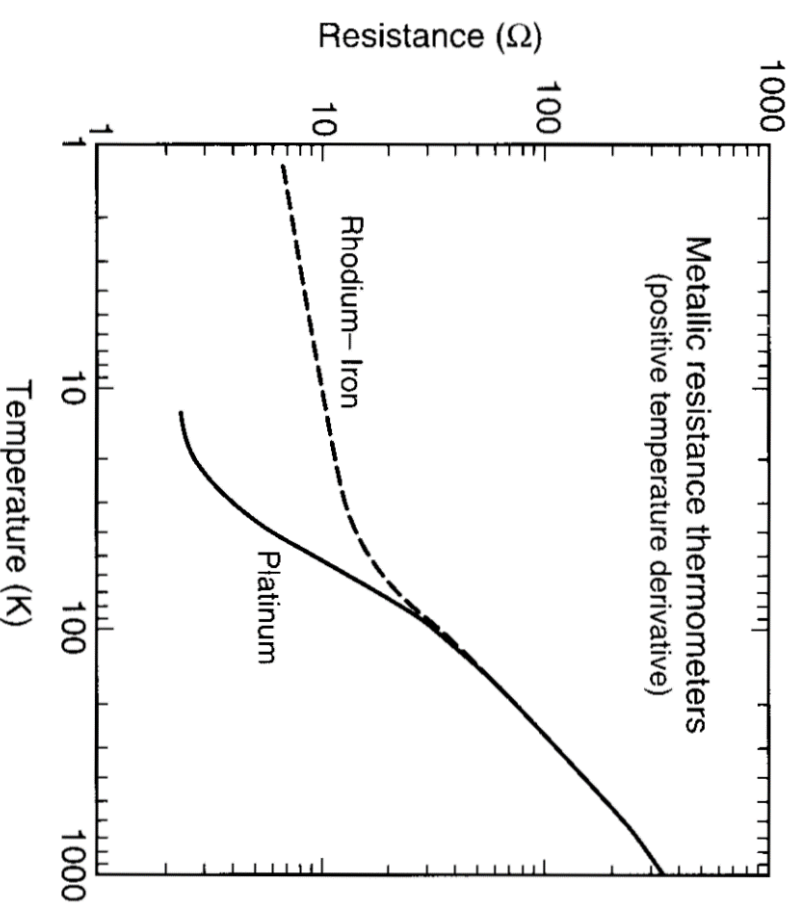
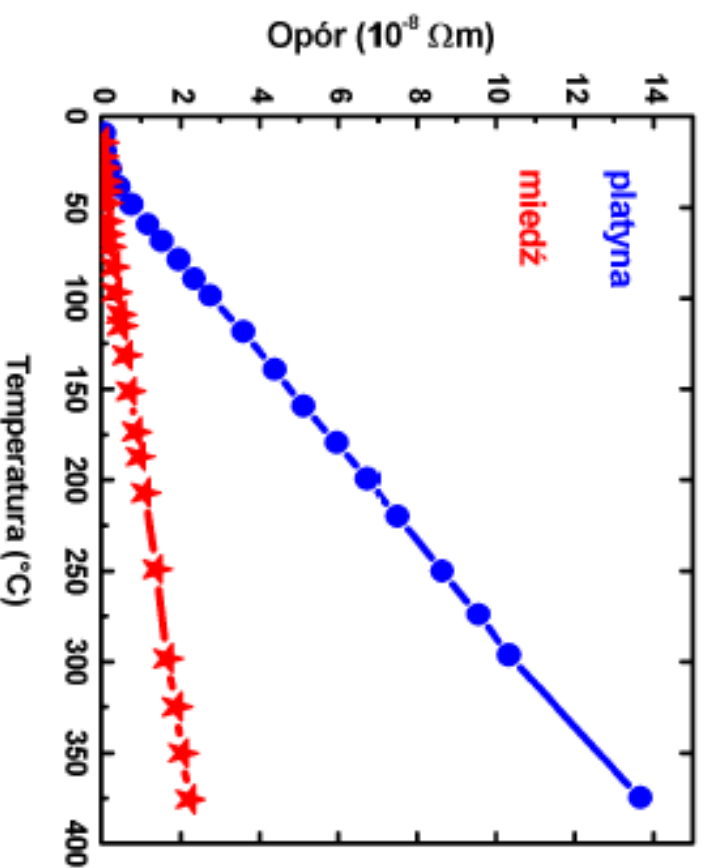
Opór przewodnika **rośnie** wraz ze **wzrostem** temperatury.

W wysokich temperaturach zależność oporu właściwego od temperatury jest bliska liniowej. Dla celów praktycznych przybliża się ją wielomianem:

$$\rho = A + B T + C T^2 + \dots$$

Na przykład dla platyny w zakresie od 300 K do 1000 K:

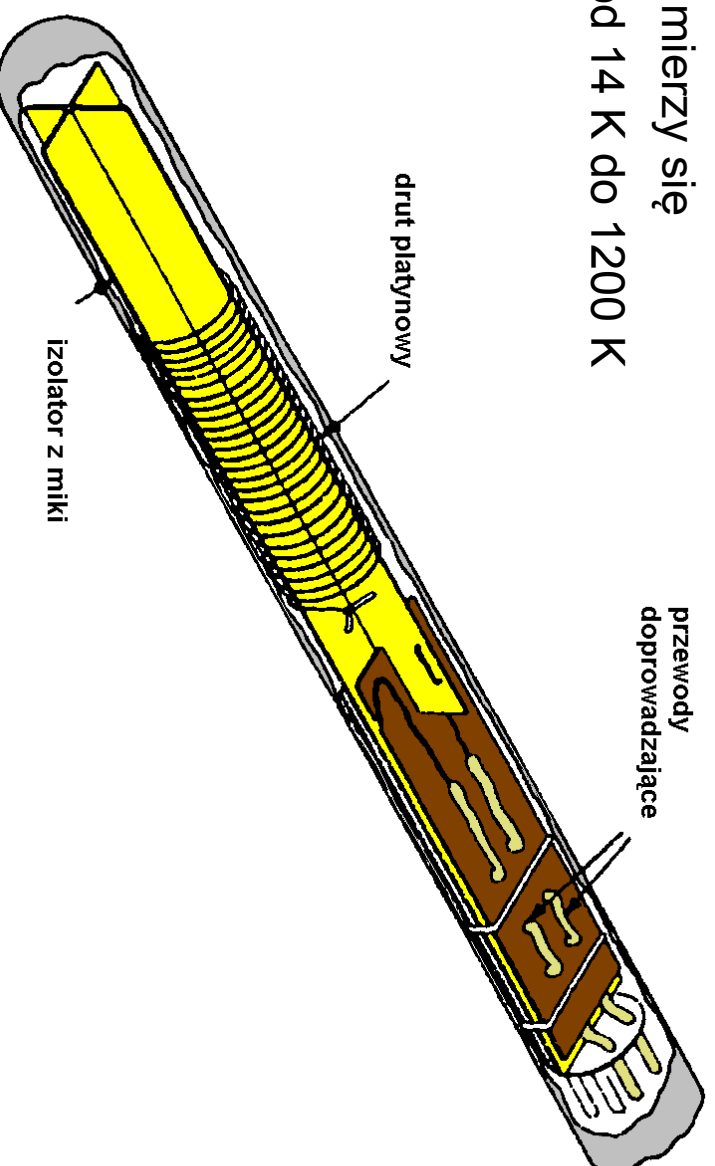
$$\rho \text{ [} \mu \Omega \text{ cm]} = -1.310 + 42.257 \cdot 10^{-3} T - 5.755 \cdot 10^{-6} T^2.$$



Ważną rolę w określaniu standardów temperatury odgrywa **oporowy termometr platynowy**.

Cienki drut platynowy owinięty jest na krzyżaku z izolatora. Pomiaru temperatury dokonuje się przez pomiar spadku napięcia na oporze platynowym przy precyzyjnie ustalonym prądzie.

Termometrem platynowym mierzy się temperatury w przedziale od 14 K do 1200 K



Półprzewodniki

W przypadku półprzewodników zasadniczą rolę odgrywa silny wzrost **koncentracji** nośników przy rosnącej temperaturze.

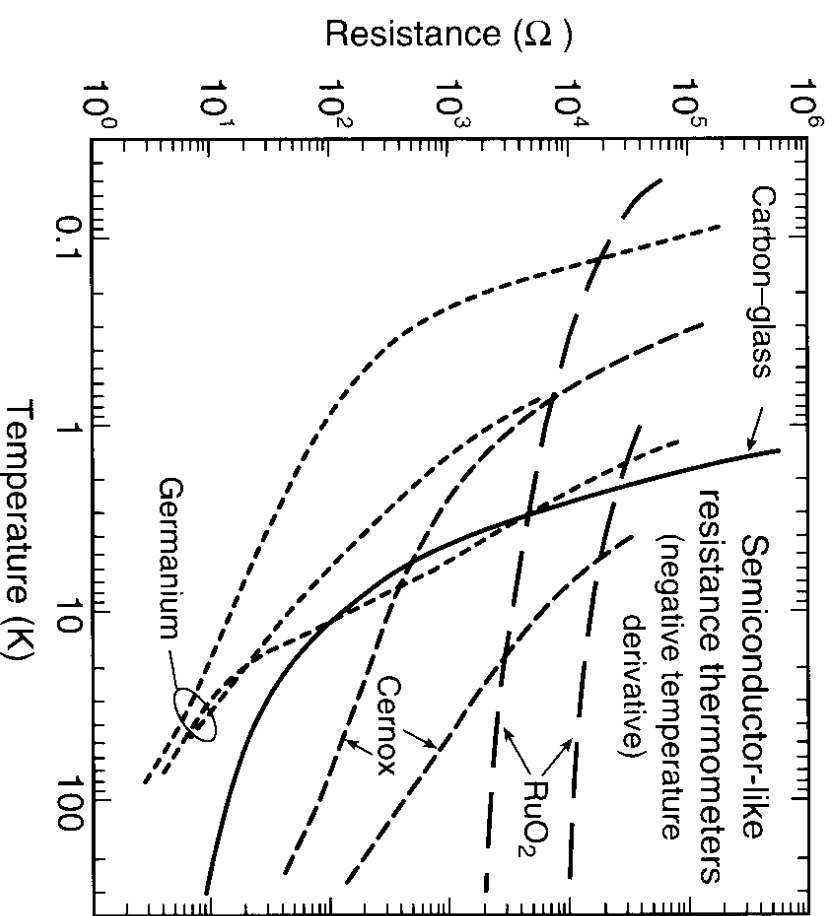
W przybliżeniu zachodzi:

$$\rho(T) = A \exp\left(-\frac{U}{T}\right).$$



Opór półprzewodnika **maleje** wraz ze **wzrostem** temperatury.

Zaletą półprzewodników jest ich duża czułość, zwłaszcza w niskich temperaturach, oraz możliwość wytworzenia czujników o bardzo małych rozmiarach.



Promieniowanie termiczne ciał – pirometry

Każde ciało jest źródłem promieniowania elektromagnetycznego, zwanego **promieniowaniem termicznym**. Widmo tego promieniowania jest ciągłe a jego natężenie i kształt zależy od temperatury ciała. Zjawisko to wykorzystuje się do pomiaru bardzo wysokich temperatur.

Zdolność emisyjna ciała, czyli ilość energii emitowanej przez jednostkę powierzchni ciała w jednostce czasu i w zakresie częstotści od ν do $\nu+d\nu$ wyraża się przez:

$$dE(\nu, T) = A(\nu, T) \cdot C(\nu, T) d\nu, \quad \text{(prawo Kirchhoffa)}$$

gdzie A oznacza zdolność absorpcyjną ciała, czyli stosunek mocy promieniowania przezeń pochłoniętego do mocy promieniowania nań padającego

$$A(\nu, T) = \frac{P_{\text{absorbowana}}}{P_{\text{padająca}}},$$

która może zależeć od rodzaju ciała, częstotści promieniowania i od temperatury, zaś C jest uniwersalną funkcją taką samą dla wszystkich ciał.

Jeśli zachodzi $A(\nu, T) \equiv 1$, czyli ciało całkowicie pochłania każde padające nań promieniowanie, to mamy do czynienia z **ciałem doskonałym czarnym**.

Bliższa rzeczywistości jest kategoria ciał, które pochłaniają stałą część padającego promieniowania, niezależnie od jego częstotliwości. Ciała takie, dla których zachodzi

$$A(\nu, T) = A \quad (0 < A < 1), \quad \text{to ciała } \mathbf{doskonałe\ szare}.$$

Poprawną postać funkcji C odkrył Planck:

$$C(\nu, T) d\nu = \frac{2\pi}{(hc)^2} \frac{(h\nu)^3}{\exp(h\nu/kT) - 1} d\nu, \quad \begin{array}{l} \text{(rozkład Plancka promieniowania} \\ \text{ciała doskonałego czarnego)} \end{array}$$

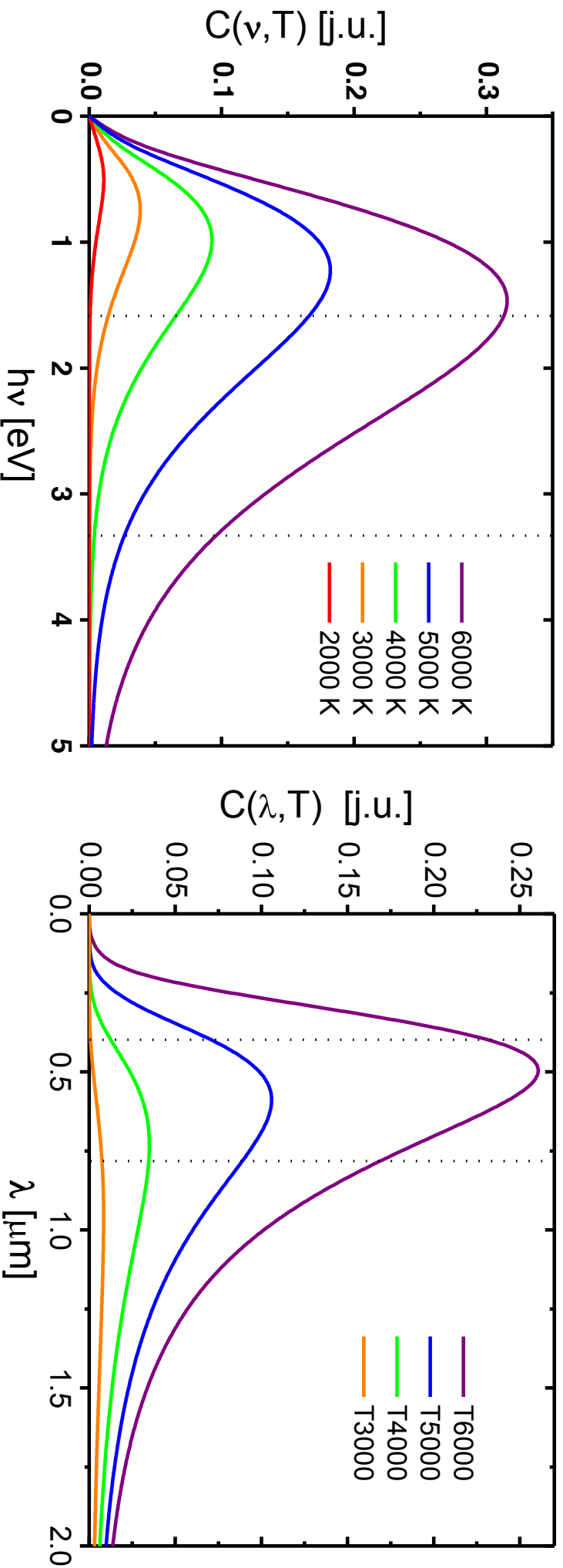
gdzie c jest prędkością światła, T oznacza temperaturę bezwzględną, h jest stałą Plancka, a k stałą Boltzmann'a:

$$c = 2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}, \quad h = 6.62607 \times 10^{-34} \text{ J s}, \quad k = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}.$$

Rozkład Plancka można też wyrazić przez długość fali promieniowania:

$$C(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} d\lambda, \quad \lambda = \frac{c}{\nu}.$$

Przykłady widm promieniowania ciała doskonale czarnego:



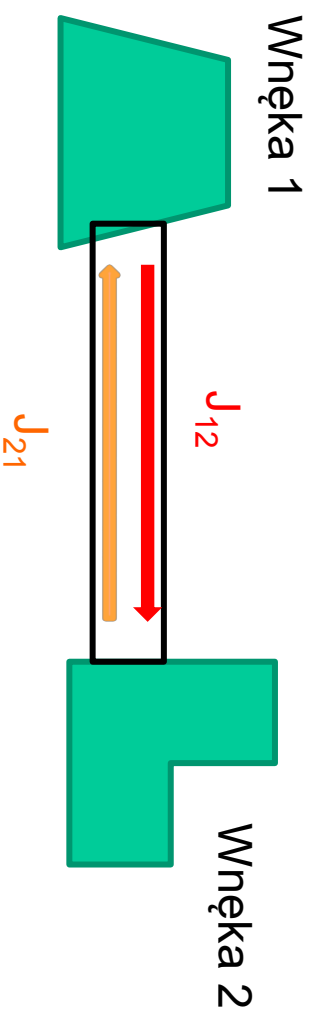
Kształt widma, pole powierzchni pod nim, a także położenie maksimum zależą od temperatury.

Położenie maksimum rozkładu opisuje **prawo Wiena**:

$$(h\nu)_{\max} = 2.8214 kT$$

$$= 2.431 \times 10^{-4} \frac{\text{eV}}{\text{K}} T$$

$$\lambda_{\max} = \frac{2898 \mu\text{m K}}{T}$$



Obydwie wnęki mają tą samą temperaturę, ale mogą np. mieć różne kształty i być wykonane z różnych materiałów.

Równowaga oznacza, że strumienie $J_{12} = J_{21}$.

Gdyby tak nie było mielibyśmy do czynienia z przesyłaniem energii z ciała o niższej temperaturze do ciała o wyższej temperaturze (co by łamało II zasadę termodynamiki, ale o tym będzie później)

Promieniowanie ciała doskonale czarnego ma rozkład Plancka, jest izotropowe w przestrzeni, nie ma wyróżnionej polaryzacji czyli nie niesie żadnej informacji poza temperaturą emitującego ciała!

To jest ściśle prawda dla wnęk o rozmiarach istotnie większych od długości fali.

Vantablack is a substance made of carbon nanotubes[1] and is the blackest substance known, absorbing a maximum of 99.965% of radiation in the visible spectrum.[2]

Its name comes from the term **V**ertically **A**ligned **N**ano**T**ube **A**rrays.



It won't show up on the catwalk any time soon, but we may see (or rather, not see) military deployment before long.

<http://www.nbcnews.com/science/science-news/vantablack-u-k-firm-shows-worlds-darkest-material-n155581>
<https://www.youtube.com/watch?v=fg2x0L4YAuU>

Całkowita energia emitowana przez jednostkę powierzchni ciała w jednostce czasu wynosi:

$$E(T) = \int dE(\nu, T) = \int_0^{\infty} A(\nu, T) \cdot C(\nu, T) d\nu.$$

Dla ciała doskonale szarego można obliczyć tę całkę:

$$E(T) = A \int_0^{\infty} C(\nu, T) d\nu = A \int_0^{\infty} \frac{2\pi}{(hc)^2} \frac{(h\nu)^3}{\exp(h\nu/kT) - 1} d\nu,$$

$$E(T) = A \sigma T^4.$$

(**prawo Stefana-Boltzmann**)

Stała σ nosi nazwę stałej Stefana-Boltzmann:

$$\sigma \equiv \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} = 5.6704 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}.$$

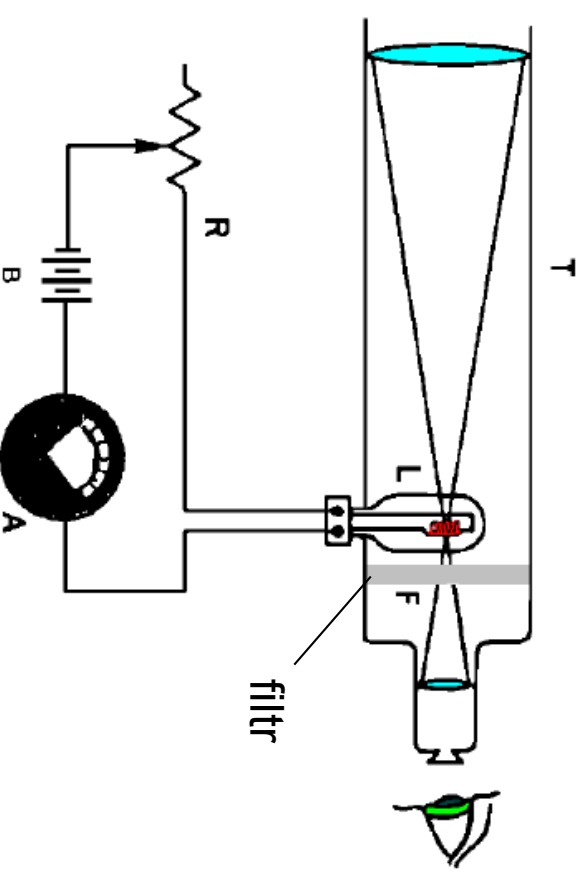
W prostych pirometrach (rys.) porównuje się jasność świecenia badanego przedmiotu ze świeceniem włókna przez który płynie regulowany prąd.

 model pirometru

W urządzeniach zaawansowanych natężenie promieniowania rejestruje się przy użyciu termopary wycechowanej przy pomocy promieniowania ze źródeł wzorcowych.

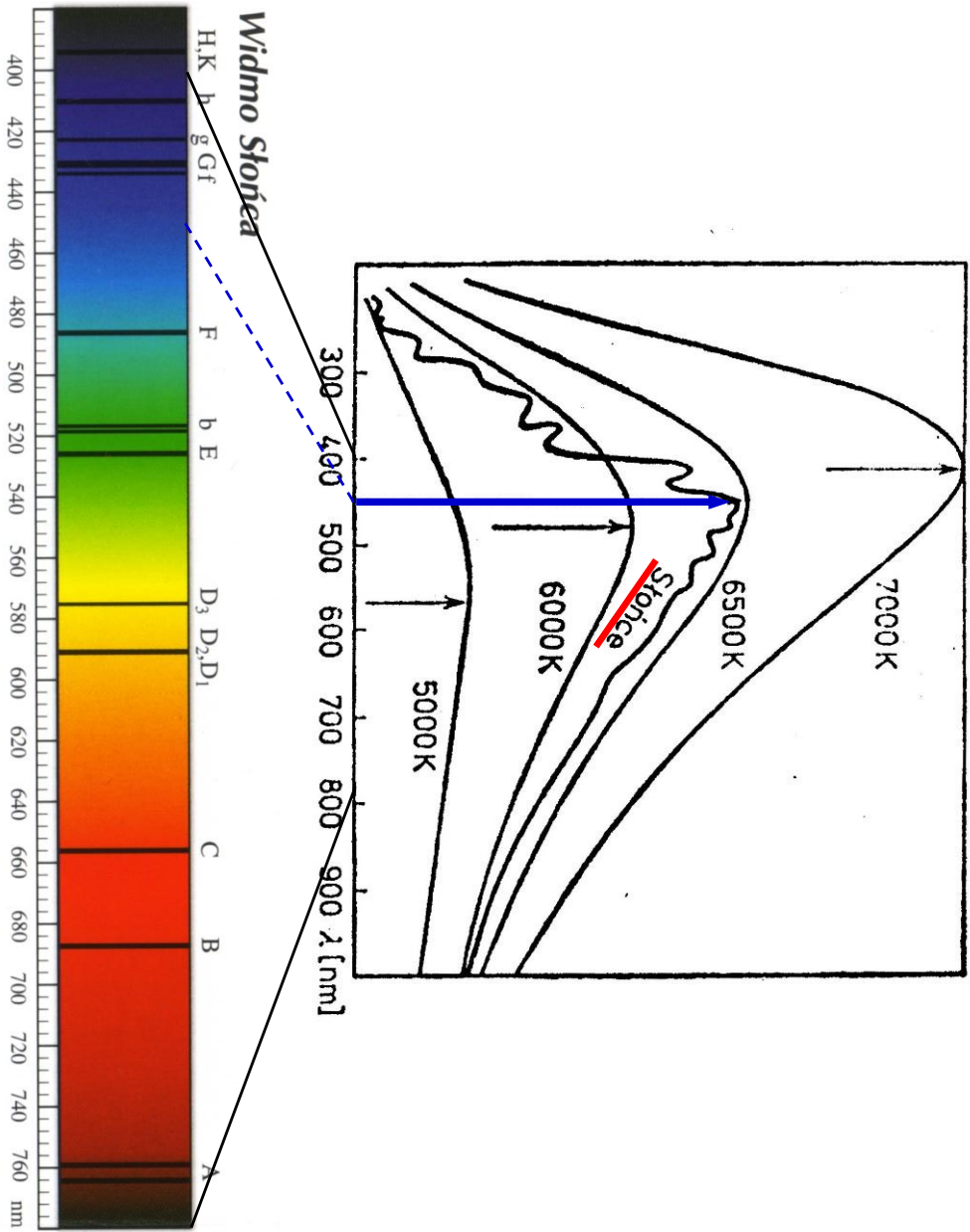
W pirometrach mierzy się promieniowanie o określonej długości fali (stosując filtry), bądź całkowite promieniowanie.

Do pomiaru temperatury odległych obiektów (np. astronomicznych) używa się pirometrów dwu- lub wielobarwnych, które rejestrują natężenie promieniowania o określonych długościach fali. Ze stosunku tych natężeń, zakładając rozkład Plancka, można obliczyć temperaturę.

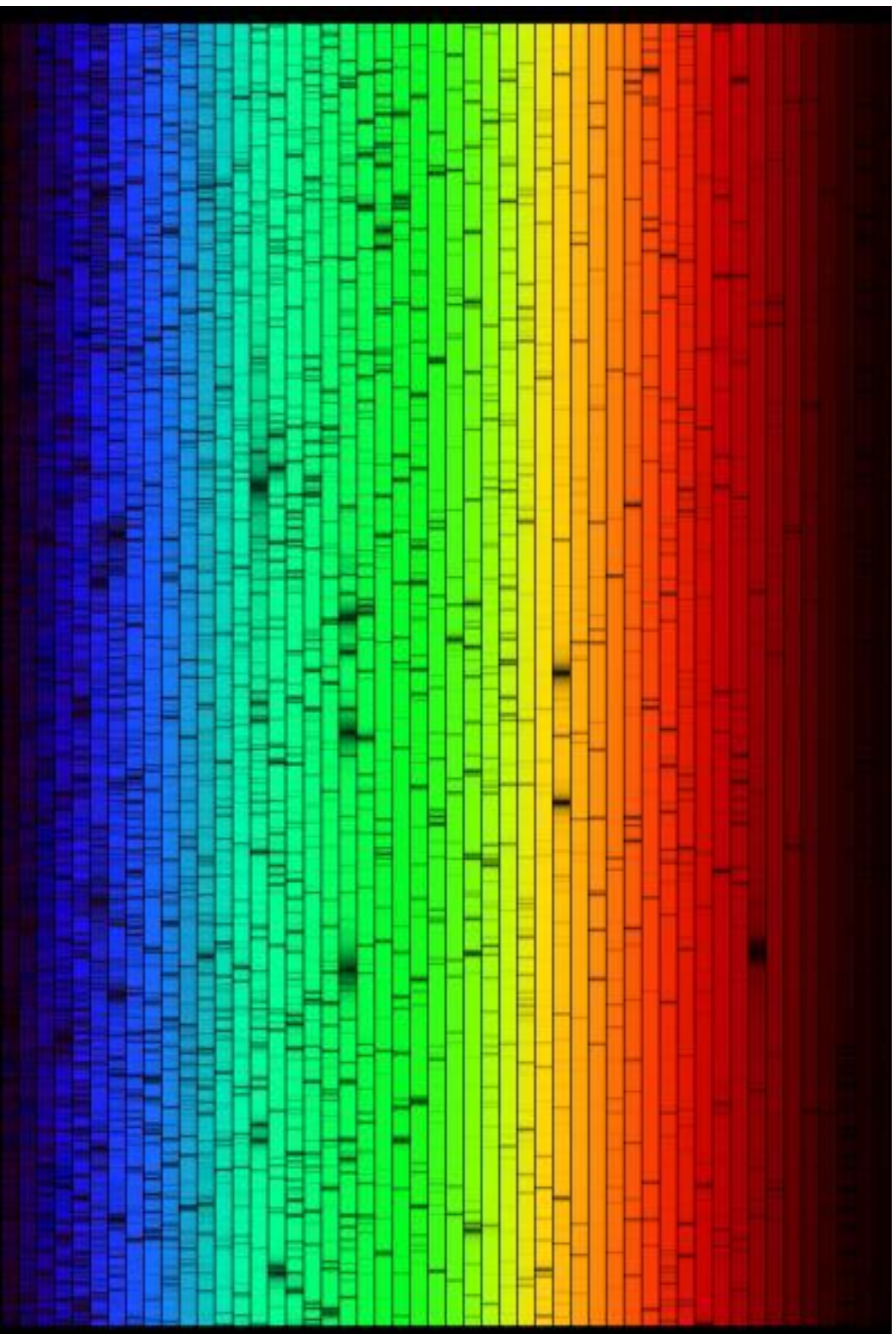


 termometr na podczerwień

Widmo promieniowania Słońca



Widzialna część widma Słońca

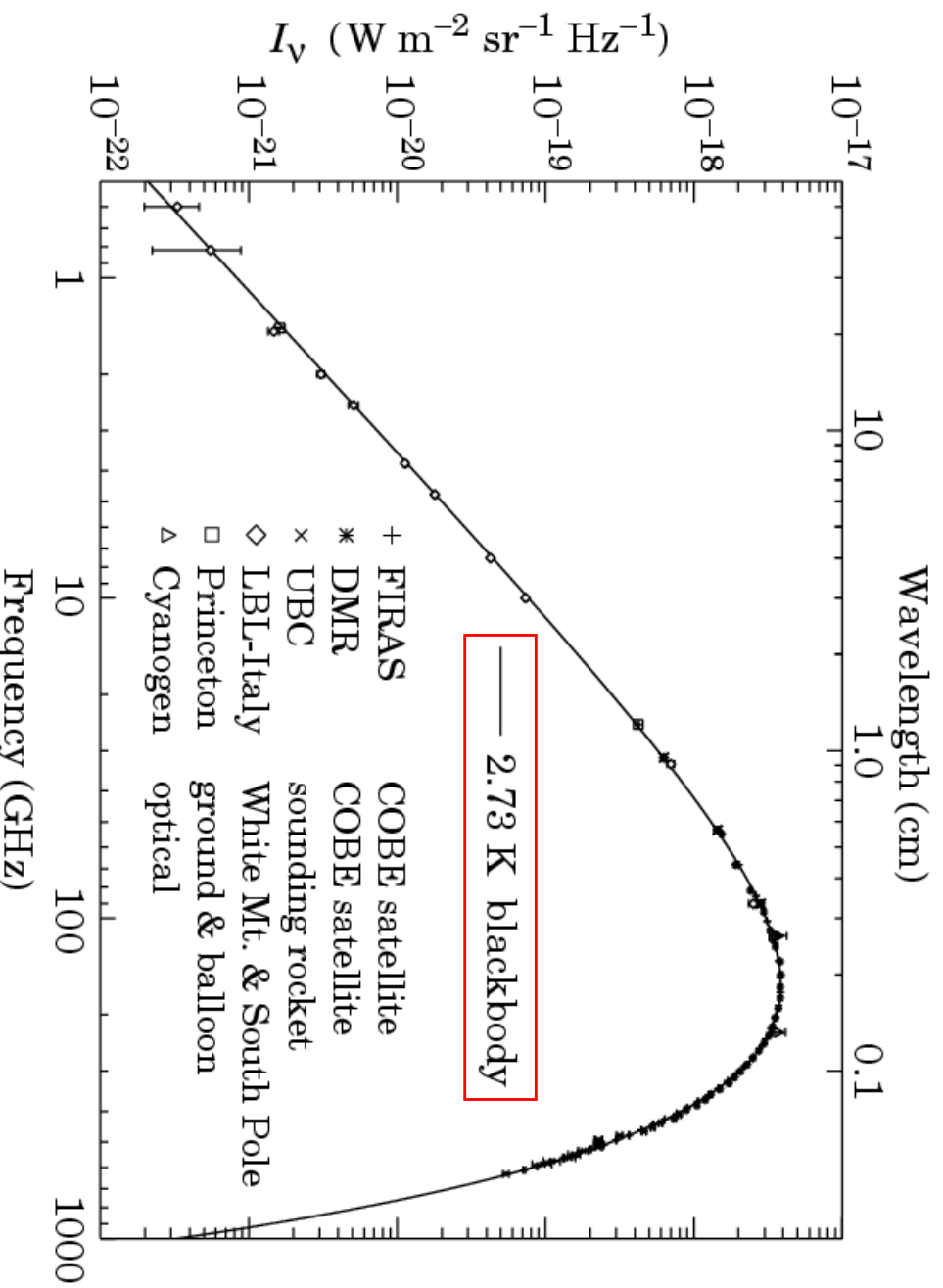


Astronomy Picture of the Day, 23.04.2006

<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html>

Mikrofalowe promieniowanie tła

W 1965 r. A. Penzias i R. Wilson odkryli promieniowanie radiowe dochodzące z kosmosu ze wszystkich kierunków. Jego widmo okazało się doskonale zgodne z rozkładem Plancka. Jest to pozostałość po Wielkim Wybuchu (promieniowanie reliktowe). Odkrycie to miało wielkie znaczenie dla kosmologii (Nobel 1978, 2006).



Międzynarodowa Skala Temperatur 1990 (ITS-90)

Definicje i wzorce przyjęte przez Międzynarodowy Komitet Miar i Wag w 1989 r.

- Jednostką temperatury termodynamicznej jest kelwin (K) zdefiniowany jako 1/273.16 temperatury punktu potrójnego wody.

- Jednostką w skali Celsjusza jest stopień ($^{\circ}\text{C}$) równy z definicji kelwinowi. Temperaturę w skali Celsjusza definiuje się jako:

$$t [^{\circ}\text{C}] = T [\text{K}] - 273.15$$

- Skala ITS-90 rozciąga się od 0.65 K do najwyższych temperatur możliwych do zmierzenia z rozkładu promieniowania Plancka.
- W następujących przedziałach określa się metodę pomiaru i interpolacji:

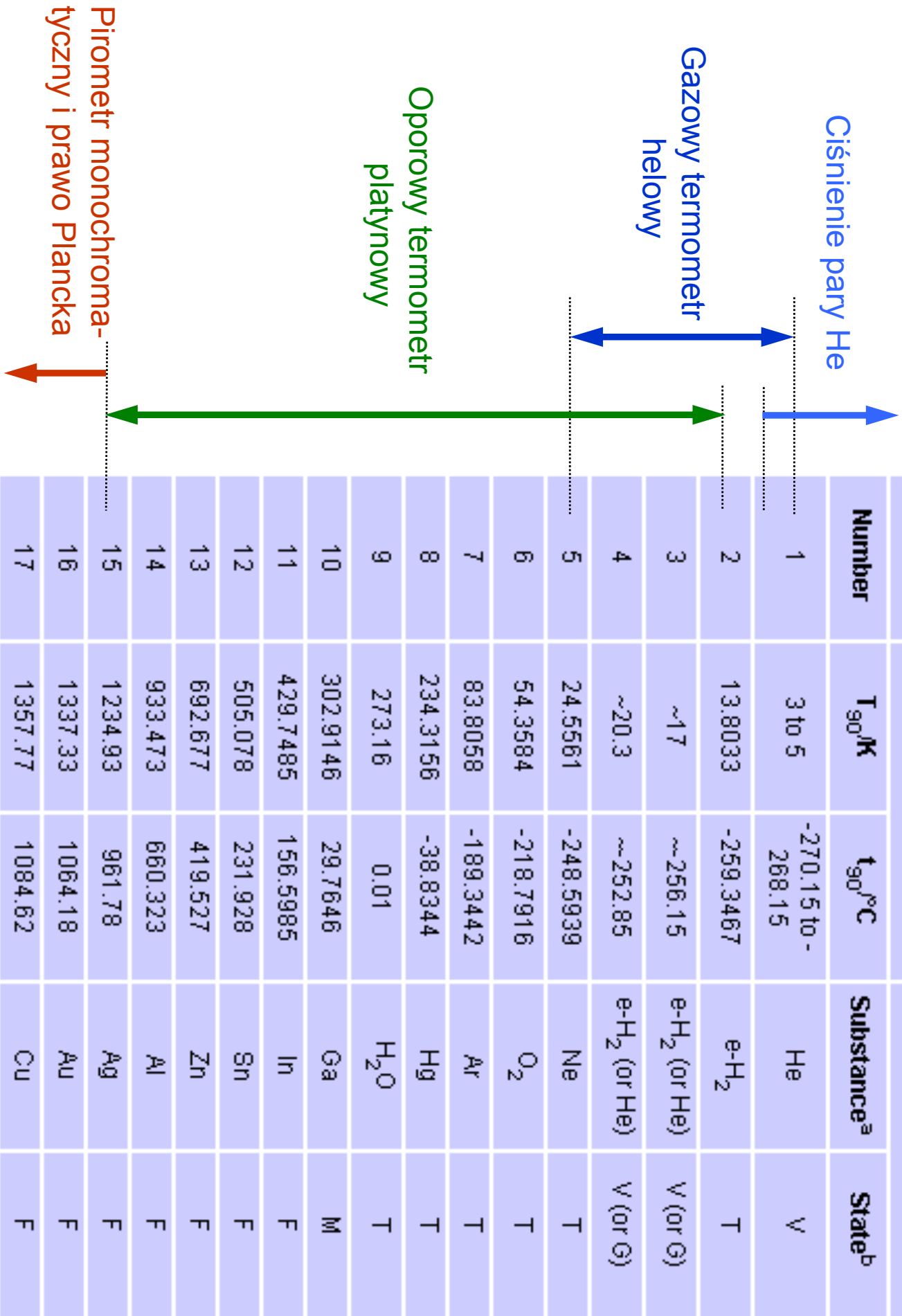
0.65 K – 5 K : zależność ciśnienia pary nasyconej ^3He i ^4He od temp.

3 K – 24.5561 K : gazowy termometr helowy.

13.8033 K – 961.78 $^{\circ}\text{C}$: oporowy termometr platynowy.

Powyżej 961.78 $^{\circ}\text{C}$: prawo promieniowania Plancka

Punkty stałe ITS-90



Różnica między stopniem Kelwina a stopniem Celsjusza

Według obecnej wiedzy temperatura zamarzania wody:

- $T_0 = (273,1500 \pm 0.0002)\text{K}$
- $T_{100} = (373,1464 \pm 0.0036)\text{K}$

zatem

- $T_{100} - T_0 = (99,9964 \pm 0,0038)\text{K}$

Jedna setna różnicy $(T_{100} - T_0)/100$ wynosi $(0,999964 \pm 0,000038)\text{K}$ a nie 1 K !

Taka rozbieżność jest nieunikniona gdy z czasem wyznaczane są wielkości fizyczne z coraz większą dokładnością

Wybrane temperatury: ciekawostki i ekstrema

- Najniższa temp. w laboratorium: $5 \times 10^{-10} \text{ K}$ – kondensacja Bosego-Einsteina atomów sodu w pułapce magneto-grawitacyjnej (2003).
- Skraplanie azotu: $-196 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (77 K).
- Najniższa temp. na Ziemi: $-89.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – Antarktyda, stacja Wostok 21.07.1983.
- Najniższa temp. w Polsce: $-40.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – Żywiec, 10.02.1929.
- Chomik w śnie zimowym: $6 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Średnia roczna temp. w W-wie: $8.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Najwyższa temp. w Polsce: $40.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – Prószków k. Opola, 29.07.1921.
- Zdrowa kaczka: $42.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Kura $41.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Kot $39 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Koń $38 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Najwyższa temp. na Ziemi: $57.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – Libia, 13.09.1922.
- Wrzenie wody (1 atm) : $99.974 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Gorąca sauna : $140 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

- Mięknięcie szkła: $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Palnik Bunsena: $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Włókno żarówki halogenowej: $2900\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Jądro Ziemi: ($5000\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Powierzchnia Słońca: $5530\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- W piorunie: $30\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Wnętrze Słońca: $1.6 \times 10^7\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Wybuch bomby atomowej: $1 \times 10^8\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Najwyższa temp. w laboratorium: $2 \times 10^9\text{ K}$ – Z-machine w Sandia NL, USA.
- Zderzenia jąder ołowiu w CERN : $\approx 10^{12}\text{ K}$ (?)

W 1775 r. w Londynie, sekretarz Royal Society z kilkoma przyjaciółmi wytrzymał przez 45 min. w pokoju, w którym temperatura powietrza wynosiła $127\text{ }^{\circ}\text{C}$. Surowy stek, który wzięli ze sobą, upiekł się w tym czasie na „well done”.